

# 核融合炉ダイバータにおける体積再結合過程に関する研究

|        |   |
|--------|---|
| 著者     | 橋 宏幸  |
| 学位授与機関 | Tohoku University   |
| 学位授与番号 | 11301甲第16374号   |
| URL    | <a href="http://hdl.handle.net/10097/60942">http://hdl.handle.net/10097/60942</a> |

たか はし ひろ ゆき  
氏 名 高 橋 宏 幸  
研究科, 専攻の名称 東北大学大学院工学研究科(博士課程) 量子エネルギー工学専攻  
学位論文題目 核融合炉ダイバータにおける体積再結合過程に関する研究  
論文審査委員 主査 東北大学教授 橋爪 秀利 東北大学教授 長谷川 晃  
東北大学准教授 北島 純男 東北大学准教授 野上 修平  
東北大学准教授 松山 成男

## 論文内容要約

プラズマ中の体積再結合過程を促進することで得られる非接触プラズマの形成は、磁場閉じ込め核融合研究の重要課題である。プラズマ対向壁に対する熱および粒子負荷制御の切り札であり、DT 核燃焼プラズマを目指す ITER では標準シナリオとされている。また核燃焼プラズマ実現のためにはプラズマの効率的閉じ込めが必須であり ITER では H モードプラズマが念頭に置かれているが、H モードプラズマでは急峻な圧力勾配が駆動する周辺局在化モード ELM により閉じ込め領域から高エネルギーのプラズマ粒子が間欠的に放出される。即ち、ITER のような次世代核融合のダイバータプラズマは、炉心から漏れ出す定常プラズマ流に加えて ELM 由来の高エネルギープラズマ流が突発的に重畳される。これを受けて ELM によりダイバータプラズマ中に発現するダイナミクス理解の重要性が指摘されている。ところが、ELM により輸送されるプラズマのエネルギーは 1 keV に到達する可能性があり従来のダイバータプラズマ模擬装置では実験的調査が困難な課題である。対して高周波プラズマ源は無電極放電装置であるため、装置外部からの高エネルギーイオンビーム入射が可能である。従って、高周波プラズマ源 DT-ALPHA とイオンビーム源を併用したダイバータプラズマ模擬実験は安定した熱流分散を目指す核融合炉ダイバータプラズマ研究への貢献が期待される。しかし、高周波放電によるダイバータプラズマ模擬装置ではこれまで体積再結合プラズマ生成の報告がなく、上記の実験に着手する上では解決しなければならない課題である。従って、本研究は高周波放電装置によるダイバータプラズマ模擬研究分野についても貢献するものとなる。

本論文は高エネルギーイオン存在下で体積再結合過程と競合する素過程の同定を目的として行った、(1) 高周波プラズマ源における体積再結合過程促進手法の確立、(2) 高周波プラズマ源 DT-ALPHA とイオンビーム源を併用した高エネルギーイオン存在下の体積再結合過程の実験的調査の2点について記述した。本論文は全6章から構成される。以降に各章について記述する。

### 第一章 序論

第一章は本論文の背景について記述した。ITER 以降の核融合発電炉では、プラズマ中の体積再結合を促進することで得られる非接触ダイバータ形成による熱流分散と、H モードプラズマによる高い閉じ込め性能の両立が要求される。このときダイバータプラズマは炉心から漏れ出す定常プラズマ流に加えて ELM 由来の間欠的高エネルギープラズマ流にさらされる。従って、次世代核融合炉ダイバータプラズマの振る舞いを予測するためには高エネルギープラズマ流存在下の体積再結合挙

動を理解しなければならない。このような課題に対しては計測機器の設置や実験パラメータ変更の柔軟さの観点から小型装置を用いたダイバータプラズマ模擬実験が有効である。しかしながら、従来のダイバータプラズマ模擬装置により高エネルギー電子流がヘリウム非接触プラズマにもたらす影響については実験的な検証が行われているものの、高エネルギーイオンに着目した研究は実験的にも数値計算的にも十分ではない。これはダイバータプラズマ中の素過程の多様さや、従来のダイバータプラズマ模擬装置では高エネルギーイオン流の生成が困難であるという装置固有の問題に起因する。従って、上記の課題に関しては新しい概念に基づくダイバータプラズマ模擬実験が要求されることを記述した。

## 第二章 研究目的および先行研究

第二章では、無電極放電装置である高周波プラズマ源は装置外部からのイオンビーム入射が可能であることから、高エネルギーイオンがもたらすダイナミクスを実験的に調査するために適した装置であることを記述した。加えて高周波プラズマ源を用いたダイバータプラズマ模擬実験を目指すために達成すべき課題、および高エネルギーイオン存在下の体積再結合挙動の実験的調査に向けたロードマップを記述した。これを受けて、第二章では本研究の目的を(1) 高周波プラズマ源における体積再結合過程促進手法の確立および、(2) 高周波プラズマ源 DT-ALPHA とイオンビーム源を併用した高エネルギーイオン存在下の体積再結合過程の実験的調査の 2 点に定めた。また、DT-ALPHA 装置の先行研究結果と他のダイバータプラズマ模擬装置との比較を行い DT-ALPHA 装置で体積再結合プラズマ生成を達成するためのプラズマパラメータを定めた。

## 第三章 実験装置

第三章では本研究において使用した高周波プラズマ源 DT-ALPHA とイオンビーム源の概要を記述した。加えて DT-ALPHA 装置およびイオンビーム源のプラズマ診断法についても記述した。

## 第四章 ヘリウム体積再結合プラズマ計測実験

第四章では DT-ALPHA 装置における初のヘリウム体積再結合プラズマ計測実験について記述した。先行研究の課題であるプラズマパラメータの改善を目的として装置内部のオリフィス配位を変更した。その結果テスト領域の電子温度および電子密度が  $T_e = 8 \text{ eV} \rightarrow 4.6 \text{ eV}$ ,  $n_e = 0.2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3} \rightarrow 1.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  となりテスト領域に供給されるプラズマの低電子温度化・高電子密度化に成功した。三体再結合速度係数は  $n_e T_e^{4.5}$  に比例するため、先行研究と比べ再結合の誘起にふさわしいプラズマ生成に成功した。これを受けてガスパフ実験を行った結果、ヘリウム体積再結合スペクトル( $2^3\text{P} - n^3\text{D}$ ,  $n = 10 \sim 15$ )の取得に初めて成功した。得られたスペクトルからボルツマンプロット法による電子温度評価を行い  $T_e \sim 0.05 \text{ eV}$  であることを確認した。また、中性粒子圧力を  $p = 20 \text{ Pa}$  程度まで増加させ再結合スペクトルの中性粒子圧力応答を計測した。その圧力応答から、中性粒子の制御により電離 - 再結合バランスを制御可能であることが示唆された。イオンビーム重畳実験時には中性粒子によるビーム束の減衰が懸念されるため、ビーム減衰の観点から許容可能な中性粒子圧力を数 Pa 程度と提示した。提示した実験条件において生成したプラズマの空間分布を静電プローブ法および発光分光法により計測した。非軸対称分布を有するプラズマの

局所的な分布を議論する手法を提示し、体積再結合過程が円柱プラズマ周辺部に局在化することを示した。この再結合過程の局在化を理解するため高周波補償プローブを設計・製作し電子エネルギー確率関数を評価した。その結果プラズマ生成部近傍とテスト領域のどちらにおいても電子は単一のマクスウェル分布であることが確かめられ、再結合過程の局在化は高エネルギー電子成分以外の要因によるものであることを示唆した。これを受け電子 – イオンの温度緩和時間に着目した議論を行った。従来はテスト領域への高電子密度プラズマ供給を目的として放電部近傍で  $n_e \geq 10^{18} \text{ m}^{-3}$  なる高電子密度プラズマの生成を行っていたが、 $n_e \sim 10^{17} \text{ m}^{-3}$  のプラズマ生成条件への変更を行った。その結果、温度緩和時間が 10 倍程度大きくなり、プラズマ生成部での電子とイオンの温度緩和の抑制に成功した。これを受けて生成した体積再結合プラズマの診断を行った結果、プラズマ中心部で再結合スペクトル強度が最大となることを確認した。これはビーム重畳実験のターゲットプラズマに適した空間分布を有するプラズマ生成に成功したことを意味するものである。

本研究を通して達成されたヘリウム体積再結合プラズマの生成は高周波放電装置によるダイバータプラズマ模擬において初の成果である。加えて、温度緩和時間に着目した議論は高周波放電装置一般における体積再結合促進手法の提示であるとともに、その手法の有効性を DT-ALPHA 装置を用いて実証したものである。

## 第五章 ヘリウム体積再結合プラズマへの高エネルギーヘリウムイオンビーム重畳実験

第五章には高エネルギーヘリウムイオンビームに対する電離進行過程および体積再結合過程挙動の調査結果を記述した。ビーム重畳実験に先駆けて、高中性粒子圧力条件下における  $E = 12 \text{ keV}$  の高エネルギーヘリウムイオンビームの輸送調査を行った。その結果、DT-ALPHA 上流部でのイオンビーム電流密度は  $j = 5 \text{ A/m}^2$  であり下流部での電流密度が  $j = 16 \text{ mA/m}^2$  であることを確認した。輸送に伴う電流密度の低下は見られるもののテスト領域まで高エネルギーヘリウムイオンビームが到達していることが確かめられた。イオンビーム電流密度の減少は空間電荷効果による発散、中性粒子との衝突、荷電交換によるビームの中性化などが考えられる。これを受けてターゲットプラズマ中へ  $E = 12 \text{ keV}$  の高エネルギーヘリウムイオンビームを重畳し電離進行過程の挙動を調査した。ビーム入射時には  $2^1\text{P} - 3^1\text{S}$ ,  $2^1\text{P} - 3^1\text{D}$ ,  $2^3\text{P} - 3^3\text{S}$  遷移の発光が有意に得られることが確認された。衝突・輻射モデルとコロナモデルに基づく議論を行い、上記の発光はイオン衝突励起に由来することを示唆した。本研究におけるイオン衝突励起の影響は衝突・輻射過程に対して 0.1% 程度である。また、 $E = 7 \text{ keV}$  のヘリウムイオンビームを用いて  $2^3\text{P} - 4^3\text{D}$  遷移の発光強度の時間発展を計測した。その結果ビームの流入により  $2^3\text{P} - 4^3\text{D}$  発光強度が 0.5% 程度減少することを確認した。この発光強度の減少に関して、荷電交換による運動量付与に着目した議論を行い高エネルギーヘリウムイオンと基底状態ヘリウム原子の荷電交換が影響することを示唆した。

次いで  $E = 12 \text{ keV}$  のイオンビーム存在下の体積再結合挙動の調査を行った。その結果イオンビーム重畳時には再結合スペクトル強度が 10% 程度減少するとの結果を得た。この発光強度の減少割合は主量子数  $n$  が大きな原子ほど顕著である。ボルツマンプロット法から電子温度を評価するとビーム入射が無い場合には  $T_e \sim 0.057 \text{ eV}$  であり、ビーム重畳時には  $T_e \sim 0.051 \text{ eV}$  である。即ち高エネルギーイオンの存在下では見かけ上プラズマの電子温度が低下する。得られた実験結果を理解するためヘリウム衝突・輻射モデルによる検討を行った。その結果、発光強度の減少と電子温度の低下を矛盾なく説明することが

困難であることが示唆された。これは実験結果を理解するためには衝突・輻射過程以外の素過程を考慮する必要があることを示唆するものである。そこで本論文では体積再結合に由来する高励起状態ヘリウム原子と高エネルギーヘリウムイオンとの荷電交換に着目した議論を行った。主量子数 $n$ が大きい原子ほど荷電交換時定数 $\tau_{cx}$ が小さい一方で自然放射遷移確率 $A$ が小さく寿命が長いため、定性的には実験結果を説明可能であることを示した。即ち高エネルギーイオンと共存する体積再結合プラズマ中では、電離進行プラズマの場合と異なり再結合由来の高励起状態原子の荷電交換が発現する可能性が指摘された。これは高エネルギーイオンの存在によりその系の体積再結合過程が抑制されることを示唆するものである。加えて、荷電交換反応によって高励起状態原子の発光を用いるプラズマ診断法が影響を受けることも示唆する。

## 第六章 結論および今後の展望

本論文は従来のダイバータプラズマ模擬装置では検証が困難であった課題である、高エネルギーイオン存在下で体積再結合過程と競合する素過程の同定を目的として行った、(1) 高周波プラズマ源における体積再結合過程促進手法の確立および、(2) 高周波プラズマ源 DT-ALPHA とイオンビーム源を併用した高エネルギーイオン存在下の体積再結合過程の実験的調査の2点について記述した。(1)ではヘリウム体積再結合スペクトルの取得に成功した。また電子とイオンとの温度緩和時間に着目し、イオンビーム重畳実験に適した空間分布を有するプラズマの生成に成功した。これら一連の成果はDT-ALPHA装置における初のヘリウム体積再結合プラズマ生成結果であるとともに、高周波放電によるダイバータプラズマ模擬装置においても初の成果である。高周波放電装置における体積再結合促進手法を提示しその有効性をDT-ALPHAを用いて実証したものである。(2)ではヘリウム体積再結合プラズマ中への高エネルギーヘリウムイオンビーム重畳実験を行った。イオンビームの有無で再結合スペクトルを取得しその結果を荷電交換時定数 $\tau_{cx}$ と自然放射遷移確率 $A$ を用いて議論した。その結果、電離進行プラズマ中とは異なり体積再結合プラズマ中では再結合由来の高励起状態原子と高エネルギーイオンとの荷電交換が発現し発光強度の減少が引き起こされることを示唆する結果を得た。即ち、高エネルギーイオン存在下にはプラズマ中の体積再結合過程が抑制される可能性が示された。更に深い理解を目指すため $\tau_{cx}^{-1}/A$ を制御する実験の提案を行い、具体的に3つの実験を提示した。また、今後の実験で目指すべきイオン流束を提示した。第六章の最後にはイオンのエネルギーと再結合イベント数に着目した議論を行い、本研究を通して達成されたパラメータ領域は実機の核融合炉で考えられるパラメータ領域に相当するため、本論文で指摘された荷電交換反応が実際の核融合炉でも起こり得ることを示唆した。以上により、本論文を通して高エネルギーイオン流と共存する核融合炉ダイバータプラズマ中で発現する素過程の同定に成功したものである。